

РОЛЬ ПЛАЗМЫ ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОРМОЖЕНИИ КАНАЛИРОВАННЫХ (В КРИСТАЛЛАХ) ЧАСТИЦ

Э. Т. ШИПАТОВ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Наблюдаемое уменьшение удельных потерь энергии у протонов с начальными энергиями (E_0) 3—7 Мэв, каналированных в монокристаллах (приблизительно в два раза по отношению к удельным потерям энергии протонов в аморфных веществах подобного химического состава) объясняют значительным уменьшением в их торможении вклада близких электронных столкновений [1—4]. Согласно правилу «равноучастия» при достаточно высоких скоростях частиц вклады потерь энергии в близких и далеких (резонансных) столкновениях частиц с атомными электронами в полные (ионизационные) потери энергии приблизительно одинаковы [5].

Рассмотрим механизм торможения каналированных протонов в ионных кристаллах в предположении, что потери энергии у них обусловлены только далекими столкновениями с атомными электронами.

В далеких электронных соударениях пролетающая частица возбуждает электроны на атомных оболочках, расположенных на расстояниях от траектории частицы, не превышающих максимального прицельного расстояния $b_{\text{макс}}$

$$b_{\text{макс}} = \frac{v \cdot \hbar}{E_i} \quad (1)$$

Здесь v — скорость частицы,

E_i — энергия связи электронов на i -оболочке атомов.

Прицельное расстояние $b_{\text{эксп}}$, в соударениях каналированной частицы с электронами на i -оболочке атома определяется по известному радиусу R_k выбранного канала и радиусу ρ_i оболочки

$$b_{\text{эксп}} = R_k - y - \rho_i, \quad (2)$$

где y — отклонение частицы от оси канала.
Для хорошо каналированных частиц $y \approx 0$ и

$$b_{\text{эксп}} \approx R_k - \rho_i.$$

Рассмотрим торможение протонов с энергией $E_0 = 4,7$ Мэв, замедляющихся вдоль направления $\langle 100 \rangle$ в монокристалле KCl. Механизм каналирования частиц в ионных кристаллах сообщен в работе [4]. Оценим $b_{\text{макс}}$, необходимое для возбуждения K - и L -электронов в атомах калия. Для K -оболочки $E_k = 3606$ эв [6] и $b_{\text{макс}} = 0,055$ Å (для $E_0 = 4,7$ Мэв). Для хорошо каналированных протонов в направ-

лении $\langle 100 \rangle$ $b_{\text{эксп}} / \approx 0,5 \text{ \AA} / \gg b_{\text{макс}}$ и, следовательно, возбуждением электронов на К-оболочке пренебрегаем. Для L-электронов $E_u = 341 \text{ эв}$ и $b_{\text{макс}} \approx 0,6 \text{ \AA}$. Возбуждением L-электронов пренебречь нельзя. Однако потери энергии у каналированных частиц уменьшаются в отношении

$$\ln \frac{b_{\text{макс}}}{b_{\text{эксп}}} / \ln \frac{2mv^2}{E_i}. \quad (3)$$

Из этого выражения находим, что потери энергии на возбуждение L-электронов в атомах калия уменьшаются на 95% и их также можно не учитывать. Подобным образом находим, что потерями энергии у каналированных протонов на возбуждение К- и L-оболочек в атомах хлора можно пренебречь. Для M-электронов атомов калия $b_{\text{макс}} \approx 5 \text{ \AA}$ ($E_M = 41 \text{ эв}$). Потери энергии на возбуждение M-электронов атомов калия уменьшаются для каналированных протонов на 50% и вносят существенный вклад в полное торможение протонов.

Совокупность валентных электронов в среде с равномерно распределенными положительными зарядами (ионных остатков) рассматриваем как плазму [7, 8]. Влиянием кристаллической структуры на возбуждение валентных электронов пренебрегаем. Все пространство разделяем на две части: 1. Область, непосредственно примыкающую к траектории частицы (протона) — область «двойных столкновений», где необходимо учитывать прямое взаимодействие частицы с отдельными (валентными) электронами. 2. На больших расстояниях от траектории частицы ($b > n^{-1/3}$) — область «плазмы», где возбуждение отдельных электронов, вносимое частицей, мало и преобладает коллективное возбуждение электронов (возбуждение плазменных колебаний с характерной частотой $\omega_p = \left(\frac{4\pi ne^2}{m} \right)^{1/2}$, здесь n — плотность валентных электронов.

Вычислим полную передачу энергии валентным электронам на единице пути:

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{вал}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{плаз}} + \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ст}}, \quad (4)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{плаз}} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} NZ_{\text{вал}} \ln \frac{v}{v_\phi}, \quad (5)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ст}} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} NZ'_{\text{вал}} \ln \frac{2mv \cdot v_\phi}{\hbar \omega_p}, \quad (6)$$

$$NZ_{\text{вал}} = n$$

где $NZ'_{\text{вал}}$ — местная плотность валентных электронов в канале, возбуждаемых частицей в двойных столкновениях,

$\hbar \omega_p$ — энергия плазмонов,

v_ϕ — скорость Ферми для валентных электронов.

Для монокристалла KCl (8 валентных электронов на молекулу KCl $\hbar \omega_p = 13,5 \text{ эв}$) и энергии протонов $4,7 \text{ Мэв}$.

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{плаз}} \approx 14 \frac{\text{Мэв}}{\text{см}}.$$

Для вычисления потерь энергии протона в двойных столкновениях с валентными электронами (второй член в выражении (4)) необходимо знать количество валентных электронов, принимающих участие в тор-

мождении каналированного протона. Величина $Z_{\text{вал}}$ определяется химическим составом монокристалла, типом выбранного канала, амплитудами колебаний частиц в канале и энергией частиц. Для $E_0 = 4,7 \text{ Мэв}$ разумно предположить, что в торможении протонов, каналированных вдоль кристаллографической оси $\langle 100 \rangle$ монокристалла KCl принимают участие все валентные электроны ($b_{\text{макс}} \approx 7 \text{ \AA} > R_k$, $n = 1,3 \cdot 10^{23} \frac{\text{эл}}{\text{см}^3}$).

Тогда

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ст}} \approx 25 \frac{\text{Мэв}}{\text{см}}.$$

Полные потери энергии у каналированных протонов ($E_0 = 4,7 \text{ Мэв}$) на возбуждение валентных электронов составляют величину

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{вал}} \approx 39 \frac{\text{Мэв}}{\text{см}},$$

которая меньше измеренных удельных потерь энергии у каналированных протонов ($E_0 = 4,7 \text{ Мэв}$) в KCl $\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{кан}} = 43 \frac{\text{Мэв}}{\text{см}}$ [4].

Величина $\left(-\frac{dE}{dx} \right) \approx 4 \text{ Мэв/см}$ — это энергия протонов, затраченная на возбуждение M -электронов в атомах калия. По известной величине $\left(-\frac{dE}{dx} \right)_M$ можно определить количество M -электронов Z_M , участвующих в торможении каналированных протонов.

Таким образом, при достаточно высоких скоростях каналированных частиц в их торможение вносят вклад далекие соударения частиц с электронами на всех оболочках атомов, входящих в состав монокристаллов и ограничивающих рассматриваемые каналы. При фиксированной энергии частиц уменьшение в их торможении вклада от электронов на внутренних оболочках связано с уменьшением амплитуд колебаний частиц в каналах решетки. Дальнейшее уменьшение вклада далеких электронных соударений в торможение каналированных частиц возможно с уменьшением энергии последних.

При энергиях каналированных частиц, меньших критической, когда

$$v < v_k \approx \frac{R_k E_{\text{ос}}}{\hbar},$$

где $E_{\text{ос}}$ — энергия связи внешних электронов ионного остатка, основной вклад в полные потери энергии обусловлен коллективным возбуждением валентных электронов. Например, для протонов, замедляющихся в монокристалле KCl вдоль направления $\langle 100 \rangle$ $E_k \approx 0,5 \text{ Мэв}$. При еще меньших энергиях частиц, замедляющихся в аморфных веществах (для протонов $E_0 \approx 1 \div 1,5 \text{ Кэв}$) происходит переход от неупругого (ионизационного) механизма торможения к механизму упругого торможения, при котором частицы теряют энергию в упругих соударениях с ядрами атомов тормозящей среды. Вследствие того, что упругие ядерные столкновения у каналированных частиц отсутствуют, ионизационное торможение остается для них основным механизмом потерь энергии до конца пробега.

В ионных кристаллах, где плотность электронов в центральных областях каналов практически равна нулю, для каналированных частиц возможны аномально большие пробеги.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Gibson, C. Erginsoy, H. E. Wegner. Phys. Rev. Letts, **13**, 530, (1964).
2. G. Dearnaley, A. R. Sattler. Phys. Rev. Letts. **15**, 59, (1964).
3. B. W. Farmer, R. S. Nelson, R. Sizman, M. W. Thompson. Nucl. Instr. and Meth. **38**, 231, (1965).
4. Э. Т. Шипатов, Б. А. (Кононов. Известия Томского политехнического института, т. 170 (в печати).
5. I. Lindhard, A. Winther. Dan. Vid. Selsk. Mat.—Fys. Medd. **34**, № 4, (1964).
6. R. D. Hill, E. L. Chruch, I. M. Mihelich. Rev. Sci. Instr. **23**, 523, (1952).
7. D. Pines. Rev. Mod. Phys. **28**, 184, (1956).
8. Д. Пайнс. Элементарные возбуждения в твердых телах, Изд-во «Мир», М., 1965.